

ДИЗАЙН

Научная статья

УДК 739.52 : 739.2

doi 10.34216/2587-6147-2022-1-55-40-47

Татьяна Викторовна Лебедева¹

Сергей Ильич Галанин²

Ольга Александровна Трошина³

Степан Николаевич Ершов⁴

^{1,2,3,4}Костромской государственный университет, г. Кострома, Россия

¹letavi44@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7744-4193>

²sgalanin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5425-348X>

³olya.troshina@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4190-4113>

⁴stepan.ershov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6768-4062>

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЮВЕЛИРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

***Аннотация.** В работе проведено исследование возможностей гравирования различных металлов и сплавов, используемых в ювелирном производстве. Гравирование образцов осуществлялось в глянцевой технике с помощью механизированной обработки на гравировальной пневмосистеме. В результате проведенных экспериментов продемонстрирована взаимосвязь качества гравированной поверхности, твердости и пластичности материалов. Сформулированы выводы и рекомендации по выбору оптимальных для гравирования материалов и адаптации режимов оборудования для выполнения гравировальных работ по различным металлам и сплавам. Рекомендации будут интересны различным специалистам ювелирного производства: ювелирам, граверам, мастерам, работающим на гравировальных пневмосистемах.*

***Ключевые слова:** гравирование, механизированная гравировка, ювелирные металлы и сплавы, глянцевая техника, твердость, пластичность, блеск, ювелирное производство, ювелирные изделия*

***Для цитирования:** Исследование гравирования различных металлов и сплавов, используемых в ювелирном производстве / Т. В. Лебедева, С. И. Галанин, О. А. Трошина, С. Н. Ершов // Технологии и качество. 2022. № 1(55). С. 40–47. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-1-55-40-47>.*

Original article

Tatiana V. Lebedeva¹

Sergey I. Galanin²

Olga A. Troshina³

Stepan N. Ershov⁴

^{1,2,3,4}Kostroma State University, Kostroma, Russia

RESEARCH OF ENGRAVING OF VARIOUS METALS AND ALLOYS, USED IN JEWELLERY PRODUCTION

***Abstract.** The paper investigates the possibilities of engraving various metals and alloys used in jewellery production. The engraving of the samples was carried out in a glossy technique using mechanised processing on an engraving pneumatic system. As a result of the conducted experiments, the relationship between the quality of the engraved surface and the hardness and plasticity of materials is demonstrated. Conclusions and recommendations on the choice of optimal materials for engraving and adaptation of equipment modes for performing engraving work on various metals and alloys are formulated. These rec-*

ommendations will be of interest to various specialists of jewellery production – jewellers, engravers, craftspeople working on engraving pneumatic systems.

Keywords: *engraving, mechanised engraving, jewellery metals and alloys, glossy technique, hardness, plasticity, gloss, jewellery production, jewellery*

For citation: Lebedeva T. V., Galanin S. I., Troshina O. A., Ershov S. N. Research of engraving of various metals and alloys, used in jewellery production. *Technologies & Quality*. 2022. No 1(55). P. 40–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-1-55-40-47>.

Гравирование – одна из популярных технологий, используемых в ювелирном производстве. Это уникальный процесс, с его помощью можно получать различные узоры, изображения, орнаменты; формировать художественный рельеф; выполнять врезную инкрустацию драгоценных и недрагоценных металлов и сплавов (всечку); выполнять операции для подготовки различных видов заготовки. Данный прием обладает широчайшим потенциалом по декорированию разнообразных ювелирных украшений, позволяет привнести в изделия элемент уникальности [1].

В последнее время технологии декорирования ювелирных изделий методом гравирования сильно изменились. Расширились их возможности, качество, спектр обрабатываемых материалов. Существуют различные технологии гравирования: ручная, механизированная, лазерная, на станках с ЧПУ. Все они обладают определенными возможностями, особенностями, преимуществами и недостатками. В работе исследуется технология механизированной гравировки, которая обладает широким спектром возможностей и позволяет получать глубокие, зеркальные (глянцевые)резы на поверхности металла практически любой твердости. Способность воссоздать идеальные «зеркала» на поверхности изделия является не только наивысшим показателем качества гравировки, но и важным аспектом с эстетической точки зрения.

Гравирование – очень трудоемкий процесс, от мастера требуется не только тщательно проработанный дизайн, но и умение подготавливать оборудование для нанесения рисунка на тот или иной материал. Наиболее простыми в технологическом плане и податливыми материалами являются сплавы на основе золота и серебра, а также некоторые сплавы на основе меди. Технология гравирования подобных материалов требует меньших финансовых и трудовых затрат по сравнению со сплавами на основе железа и титана. Если для получения необходимых механических свойств драгоценных сплавов на этапе легирования требуется подобрать необходимое процентное соотношение определенных примесей, то ситуация со сплавами на

основе железа и титана обстоит иначе, часто приходится перестраивать технологический процесс под металл, а не наоборот.

Наиболее распространенными металлами и сплавами, подвергаемыми гравировке в ювелирной промышленности и при декоративной обработке, являются: золото чистое и 585 и 750 проб, серебро чистое и 925 пробы, нейзильбер, мельхиор, латунь, бронза, медь, нержавеющая сталь, титан. Эти металлы и сплавы не только подвергаются декоративной обработке, но и сами могут являться элементами врезной инкрустации. Гравировка и инкрустация данных материалов, благодаря их механическим и эстетическим свойствам, обладает достаточно широким потенциалом: широкой цветовой палитрой различными показателями твердости и пластичности, стойкостью к воздействию окружающей среды, способностью демонстрировать различные визуальные эффекты. Однако на сегодняшний день в литературе практически отсутствуют рекомендации по выбору и адаптации оборудования механизированной гравировки для выполнения гравировальных работ по различным металлам и сплавам, а также сведения относительно получаемого глянца на поверхности гравированных материалов.

Основные задачи экспериментальной работы: исследование возможностей гравирования различных металлов и сплавов; исследование качества получаемого глянца и его зависимости от показателей твердости и пластичности; определение трудоемкости гравирования исследуемых материалов; выработка рекомендаций по определению режимов гравировки и подготовки инструментов для гравировки по исследуемым металлам и сплавам; формирование рекомендаций по выбору материала и адаптации режимов гравировального оборудования для выполнения гравировальных работ по различным металлам и сплавам.

Исследуемые металлы и сплавы

Для исследований использовались образцы в форме квадратного проката сечением 10×1 мм из следующих материалов: чистое золото 999 пробы, сплав ЗлСрМ 585-80, чистое серебро 999 пробы, сплав СрМ 925, медь М006,

нейзильбер МНЦ 15-20, мельхиор МН 19, латунь Л63, бронза BR10S, нержавеющая сталь 904L, сплав титана ОТ4.

Для лучшего визуального восприятия и получения контраста между матовой основной поверхностью заготовки и глянцем получаемого реза образцы обрабатывались наждачной бумагой абразивностью 600. Затем заготовки обезжиривались погружением в емкость со спиртовым раствором.

Экспериментальное гравирование образцов выполнялось в глянцевой технике, характерным признаком которой являются безукоризненно ровные и блестящие резы после прохождения штихелем.

Степень блеска – это величина интенсивности рассеивания света или способность металла блестеть и отражать свет, важный показатель для определения целесообразности декоративной обработки гравированием конкретного материала. Для определения уровня блеска за эталон принята степень глянца зеркала, равная 100. Измерение блеска производилось с помощью блескомера БФ5М согласно ГОСТ Р 52663–2006.

Для формирования рекомендаций по результатам исследований визуальных наблюдений недостаточно, необходимо учитывать точные показатели, характеризующие конкретные механические свойства металлов и сплавов. Наиболее актуальными механическими свойствами, способными прямо и косвенно объяснить поведение металла или сплава в процессе гравировальных работ, являются твердость и пластичность.

Твердость – способность материала противостоять проникновению в него другого более твердого тела. Трудозатраты при резании штихелем пропорциональны твердости.

Пластичность – свойство материала изменять свою форму под нагрузкой без появления трещин (без нарушения сплошности) и сохранять эту форму после снятия нагрузки [2].

Ниже приведены краткие характеристики исследуемых материалов.

1. **Чистое золото Зл 999** широко используется в граверном деле благодаря низкому показателю твердости, контрастному цвету и недрасположенности к окислению и коррозии. Как правило, чистое золото используется как материал для врезной инкрустации. Также чистое золото после всечтения в более твердый материал подвергают гравировке [3].

2. **Сплав ЗлСрМ 585-80** наиболее распространен в ювелирном деле, так как обладает оптимальными показателями твердости и пластичности, хорошо полируется и отлично бле-

стит. В граверном деле широко используется в качестве обрабатываемого материала и подвергается самой различной декоративной обработке. Также возможна инкрустация данным сплавом изделий из титана и стали.

3. **Чистое серебро Ср 999** используется в граверном деле наравне с чистым золотом, обладая аналогичными свойствами: пониженной твердостью, контрастным цветом и отсутствием предрасположенности к коррозии и окислению. В гравировке в основном применяется как врезной материал. Также чистое серебро после всечтения в более твердый материал подвергают гравировке.

4. **Сплав СрМ 925** наиболее распространен в ювелирном деле, так как обладает оптимальными показателями твердости и пластичности. В граверном деле сплав широко используется как обрабатываемый материал и подвергается самой различной декоративной обработке.

5. **Медь М00б** используется в граверном деле, однако по сравнению с чистым золотом и серебром у нее преимуществ значительно меньше. Главный минус меди – повышенная окислительная способность. Она гораздо тверже чистого серебра, пластична, хорошо полируется и блесит. Однако из-за высокого показателя вязкости резы после прохождения штихелем не обладают глянцем. В гравировке в основном используется как врезной материал, так как высокий уровень вязкости не позволяет осуществлять качественную гравировку. Медь обладает контрастным цветом и приемлемым показателем твердости для врезной инкрустации.

6. **Мельхиор МН 19** достаточно популярен у ювелиров благодаря сбалансированным механическим свойствам. Если не считать относительно высокую температуру плавления и уступающий уровень блеска по сравнению со сплавом серебра 925 пробы, то мельхиор является хорошим аналогом с достойным показателем твердости, пластичности и пригодности к гравировке. Как врезной материал в граверном деле не используется.

7. **Нейзильбер МНЦ 15-20** почти не уступает по механическим свойствам мельхиору, кроме слегка повышенного уровня твердости из-за наличия цинка. Пластичен, хорошо полируется, обладает достаточным уровнем блеска, так же как и мельхиор пригоден для гравировальных работ [4].

8. **Латунь Л63** в связи с высоким содержанием цинка обладает хорошими механическими свойствами и относительной дешевизной по сравнению со сплавами, содержащими больше меди. Обладает высокой эстетической

ценностью, показатели твердости и пластичности близки к таковым у серебра 925 пробы. Сплав не очень пригоден для гравировки в силу своей вязкости, однако легко поддается резанию. Как врезной элемент в граверном деле используется редко [5].

9. **Оловянная бронза BR10S** – универсальный сплав для литья по выплавляемым моделям. Имеет отличную механическую прочность и пониженный уровень пористости. В граверном деле используется исключительно как обрабатываемый материал [5].

10. **Нержавеющая сталь AUSI 904L (06ХН28МДТ)** имеет высокий показатель устойчивости к коррозии и высокое сопротивле-

ние к окислению. Обладает высоким уровнем твердости и относительной пластичностью, сложно полируется. Хорошо поддается гравировке, пластичность сплава обеспечивает комфортное формирование и прочность заусенцев в выбранных полостях для всечтения мягкого металла.

11. **Сплав титана OT4** отличается гипоаллергенностью, высокой стойкостью к коррозии и малым удельным весом. Имеет очень высокие показатели твердости и низкий уровень пластичности, не полируется вручную. Работать с этим материалом очень тяжело из-за крайне высоких показателей твердости и вязкости [7]. Показатели твердости и пластичности исследуемых металлов и сплавов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица показателей твердости и пластичности

Металл (сплав)	Твердость по Бринеллю, НВ	Пластичность, %
Чистое золото	18	60
Чистое серебро	25	60
Медь М00б	35	60
Сплав СрМ 925	60	50
Латунь Л63	68	45
Сплав ЗлСрМ 585-80	89	50
Мельхиор МН 19	93	45
Нейзильбер МНЦ 15-20	99	45
Бронза BR10S	115	40
Нержавеющая сталь 904L	147	35
Сплав титана OT4	246	10

Оборудование и инструменты для исследований

Для проведения экспериментов использовались следующие оборудование и инструменты.

Гравировальная пневмосистема Graver Smith предназначена для приема воздуха под давлением с последующим перенаправлением воздушного потока в виде импульсов в накопитель.

Воздушный безмасляный компрессор CL751-35 предназначен для накачки воздуха и направления его под определенным давлением в гравировальную установку.

Наконечник QC 901 – прибор для установки державки, предназначен для приема воздушных импульсов и передачи ударной силы за счет движущегося бойка в плунжере.

Державка – инструмент для фиксации штихеля.

Штихель – основной штихель для выполнения гравировки в глянцевой технике. Штихель – режущий инструмент для гравирования, представляет собой цельную продольную спицу длиной 4 см. Для проведения эксперимента использовались спицы марки С-Мах из карбида вольфрама, который обладает высокой твердостью, пониженной хрупкостью и способен выдерживать значительные нагрузки, при-

кладываемые в процессе гравирования и за-крепки камней.

Шарногель MicroBlock необходим для фиксации заготовки в процессе гравирования. Представляет собой тиски, зафиксированные на сферической форме, вращающиеся на 360° по горизонтали. Сам шарногель установлен на подставке и за счет сферической формы способен вращаться на 180° по трем осям X, Y, Z.

Микроскоп HAYEAR 3.5X-45X Simul-Focal необходим для выполнения более качественных и точных работ, детального осмотра получаемого реза. Имеет возможность фиксации светодиодной лампы.

Power Hone – мотор, вращающий сменные заточные диски разной зернистости. Необходим для быстрой заточки штихеля под нужным углом.

Шаблон 120° предназначен для заточки профиля штихеля.

Таймер необходим для фиксации времени гравирования.

Методика эксперимента

В процессе эксперимента на подготовленных образцах вырезались одинаковые закольцованные линии с определенными параметрами (глубина реза, ширина реза и длина прорезае-

мой линии). В ходе эксперимента фиксировалось количество проходов штихелем по прорезаемой линии и временные затраты для достижения необходимого результата, а также состояние штихеля после выполнения задания. Эксперимент включает в себя следующие основные этапы.

1. **Заточка штихеля.** Заточку начинают с формирования универсального угла атаки, составляющего $52,5^\circ$. Затем затачивают угол подъема под постоянным углом в 5° , одновременно формируя соответствующий профиль. Далее приступают к формированию угла фасок, который, как правило, составляет 15° – 17° (рис. 1). Все операции над спицей производят при помощи шаблона для заточки штихеля, изготовленного из полимерного стекла и стального фиксатора, фиксирующего державку со спицей и соединяющего их с шаблоном.

2. **Настройка микроскопа** производится по стандартной методике.

3. **Настройка гравировальной системы.** Параметры настройки системы выбирались стандартными, рекомендуемые производителем. Включают компрессор и ожидают завершения накачки воздуха. На манометре компрессора выставляют давление, необходимое для стабильной работы системы в 2 атмосферы. Поворачивают рычаг, высвобождающий воздух и направляющий его в систему. Проверяют давление манометра компрессора. Убедившись, что давление не упало, включают Graver Smith (не-

соблюдение очередности включения и величины рабочего давления может привести к поломке системы). На системе выставляют частоту ударов (для выполнения стандартных работ стрелка должна находиться между 23 и 33). Сбрасывают давление на манометре, если оно есть. Берут наконечник в левую руку и прикладывают к уху. Правой ногой осуществляют полунажатие на педаль и правой рукой медленно увеличивают давление на манометре. Когда плунжер прекратит удары, система будет готова начать работу.

4. **Гравирование.** Заготовку зажимают в тисках шарногеля. Циркулем по металлу очерчивают из одной точки сначала круг диаметром 7 мм, затем круг диаметром 6 мм. Так получают закольцованную линию длиной около 2 см. Острые штихеля устанавливают между очерченными границами прорезаемой линии и нажатием на педаль начинают гравировать, углубляя штихель на необходимую глубину, равную 0,5 мм. Резец ведут до тех пор, пока круг не будет полностью вырезан, параллельно засекая продолжительность резания. Если твердость металла не позволяет обеспечить необходимую глубину и ширину реза, процедуру повторяют, пока очерченная область не будет полностью вырезана.

5. **Контроль.** Проводят визуальный осмотр всех отгравированных образцов под микроскопом, измерение степени блеска, полученные результаты заносят в таблицу.

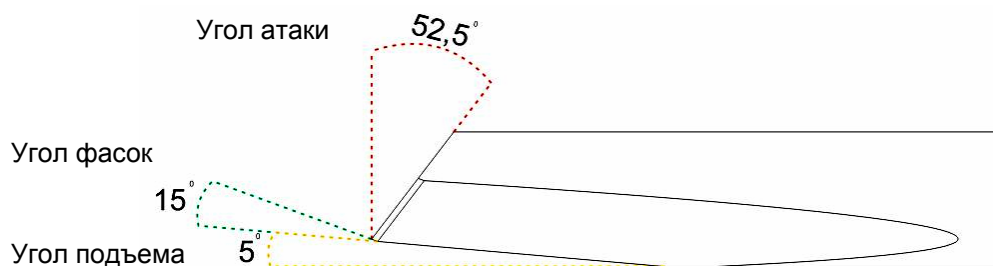


Рис. 1. Углы заточки штихеля

Результаты исследования

В ходе исследования отгравированы закольцованные линии глубиной 0,5 мм и шириной в 1 мм на одиннадцати образцах (рис. 2).

По результатам исследования сформирована диаграмма расположения образцов от самого матового до самого глянцевого реза (рис. 3). Критерии распределения металлов по принадлежности к конкретной группе блеска

представлены в табл. 2. Результаты исследования особенностей гравирования различных металлов и сплавов представлены в табл. 3. В процессе гравирования более твердых материалов возможно скалывание «носика» штихеля, в связи с этим необходимо адаптировать параметры заточки штихеля. В табл. 3 приведены экспериментально определенные рекомендуемые углы заточки штихеля при обработке стали и титана.



Рис. 2. Вырезанные закольцованные линии

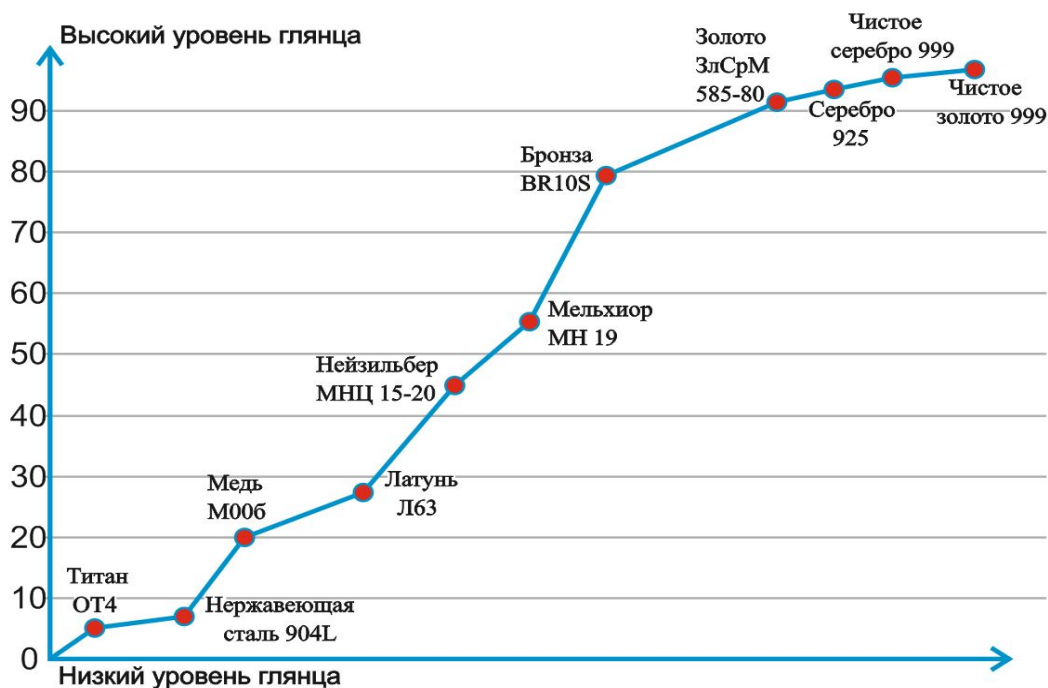


Рис. 3. Диаграмма показателей глянца

Таблица 2

Группы блеска поверхности

Группа блеска	Степень блеска, %	Внешний вид
Матовая	0...10	Слабо отражает свет
Полуматовая	11...35	Дает слабый блеск
Полуглянцевая	36...60	Средняя степень блеска
Глянцевая	61...80	Притягивает внимание. Подчеркивает неровности. Глянцевые резы с блестящим эффектом
Высокоглянцевая	80...100	Отражает много света, сильно блестящий эффект

Таблица 3

Результаты исследования особенностей гравирования различных металлов и сплавов

Металл (сплав)	Зл 999	Ср 999	СрМ 925	ЗлСрМ 585-80	Бронза BR10S	Мельхиор МН 19	Нейзильбер МНЦ 15-20	Латунь Л63	Медь M006	Сталь 904L	Титан OT4
Продолжительность обработки, мин	1,05	1,13	1,34	1,45	2,25	1,47	1,56	1,37	1,29	3,56	7,12
Положение металла в перечне исследуемых, относительно уровня полученного глянца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Количество проходов штихелем по прорезаемой линии	1		2					1		3	5

Окончание табл. 3

Металл/сплав	Зл 999	Ср 999	СрМ 925	ЗлСрМ 585-80	Бронза BR10S	Мельхиор МН 19	Нейзильбер МНЦ 15-20	Латунь Л63	Медь М00б	Сталь 904L	Титан OT4
Состояние штихеля после выполнения задания	Чистые фаски					Загрязненные фаски			Чистые фаски	Загрязненные фаски	
Экспериментально определенные рекомендуемые особенности заточки инструмента						Ат. 52,5*; Под. 17**			Ат. 70 Под. 25		

Примечания: * Ат. – угол атаки, град;

** Под. – угол подъема, град.

Выводы и рекомендации

По итогам исследования возможностей гравирования различных металлов и сплавов сформированы следующие выводы и рекомендации.

1. Наилучшим глянцем обладают чистое золото, чистое серебро и сплавы на их основе. Средний глянец имеют сплавы на основе меди. И почти отсутствие глянца, матовый рез наблюдается у стали и титана.

2. Прослеживается взаимосвязь между уровнем получаемого глянца и показателями твердости и пластичности исследуемых материалов. Чем выше показатель твердости, тем ниже уровень глянца получаемого реза. Чем ниже уровень пластичности, тем более матовым получается рез.

3. Исключения по обоим показателям составили чистая медь М00б и латунь Л63. В ходе исследований данные материалы показали полуматовый уровень глянца, несмотря на то, что не являются твердыми материалами. Скорее всего, результат чистой меди обусловлен высоким показателем вязкости металла. Полуматовый рез латуни, возможно, связан с высоким содержанием цинка, так как режущая кромка штихеля после гравировки была загрязнена. Аналогичная ситуация прослеживается и с нейзильбером, где также присутствует цинк.

4. К сплаву, не поддерживающему общую тенденцию, можно отнести и бронзу BR10S. Бронза относится к группе твердых материалов, но, несмотря на это, срезанная грань глянцевая.

Возможно, полученный результат обусловлен наличием в составе сплава олова.

5. Эксперимент показал необходимость изменения углов заточки штихеля относительно стандартных параметров при выполнении гравировальных работ по стали и титану, а также изменения режимов настройки гравировальной пневмосистемы при выполнении работ по чистому золоту и серебру.

6. Для гравировки по стали и титану необходимо увеличить угол фасок от универсального значения в 15° до 25°...30°, а также увеличить угол атаки с 52,5° до 60°...70°. Данная мера предотвратит скалывание носика у штихеля во время гравировки и позволит реже подполировывать резец.

7. Для гравировки по чистому золоту и серебру не подходит стандартный режим настройки частоты ударов в минуту, равный 2400. Штихель «забурируется» в мягкий металл. Для решения этой проблемы необходимо увеличить частоту ударов в минуту до 3300, что позволит вести штихель по поверхности металла, обеспечивая отсутствие брака.

8. Оптимальными материалами для гравирования в глянцевой технике являются сплавы СрМ 925, ЗлСрМ 585-80 и BR10S. Они отличаются сбалансированными механическими свойствами, обладают достаточно высокими показателями глянца, демонстрируют высокие технологические показатели в процессе гравирования, не требуют изменения параметров и дополнительной настройки оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Галанин С. И., Арнольди Н. М., Зезин Р. Б. Технология ювелирного производства : учеб. издание / под общ. ред. Ю. А. Василенко. М. : СПМ-Индустрия, 2017. 511 с.
2. Пластичность металлов // Библиотека технической литературы : информационный сайт. URL: <http://delta-grup.ru/bibliot/18/11.htm> (дата обращения: 11.08.2021).
3. Физические и химические свойства золота, проба золота // Золотодобыча. Добыча золота, технологии, оборудование : информационный сайт. URL: <https://zolotodb.ru/article/10060> (дата обращения: 11.08.2021).
4. ГОСТ 5187–2003. Ленты из мельхиора, нейзильбера и монеля. Технические условия. Введ. 2004–09–01. М. : Изд-во стандартов, 2004. 15 с.

5. Свойства латуней. Латуни и латунный прокат : информационный сайт. URL: <http://normis.com.ua/latun> (дата обращения: 15.02.2021).
6. Художественное литье бронзы – ювелирная бронза BR10S : информационный сайт. URL: <https://bronzamania.ru/blogs/blog/vse-o-yuvelirnoy-bronze> (дата обращения: 11.08.2021).
7. OT4 – титановый деформируемый сплав // Марочник стали и сплавов : информационный сайт. URL: http://splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1293 (дата обращения: 11.08.2021).

REFERENCES

1. Galanin S. I., Arnoldi N. M., Zezin R. B., Vasilenko Yu. A. (ed.). Technology of jewelry production. Moscow, SPM-Industry, 2017. 511 p. (In Russ.)
2. Ductility of metals // Library of technical literature: information site. (In Russ.). URL: <http://delta-grup.ru/bibliot/18/11.htm> (accessed 11.08.2021).
3. Physical and chemical properties of gold, gold sample // Zolotodocha. Gold mining, technology, equipment: information site. (In Russ.). URL: <https://zolotodb.ru/article/10060> (accessed 11.08.2021).
4. *GOST 5187–2003. Lenty iz mel'hiora, nezil'bera i monelya. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 5187–2003. Ribbons of melchior, neisilber and monel. Specifications]. 2004–09–01. Moscow: Publishing House of Standards, 2004. 15 p. (In Russ.)
5. Properties of brass. Brass and brass rental: information site. (In Russ.). URL: <http://normis.com.ua/latun> (accessed 15.02.2021).
6. Artistic bronze casting – jewelry bronze BR10S: information site. (In Russ.). URL: <https://bronzamania.ru/blogs/blog/vse-o-yuvelirnoy-bronze> (accessed 11.08.2021).
7. OT4 – Titanium Deformable Alloy // Steel and Splice Label: information site. (In Russ.). URL: http://splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1293 (accessed 11.08.2021).

Статья поступила в редакцию 18.01.2022
Принята к публикации 22.02.2022